

文章编号: 1007-4619 (2005)01-0001-07

叶片生化组分浓度对单叶光谱影响研究 ——以 2100nm 吸收特征的碳氮比反演为例

施润和^{1,2,3}, 牛 铮², 庄大方¹

(1. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101;

2. 中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院 研究生院, 北京 100039)

摘 要: 运用连续统去除法和波深归一化方法对构成植物叶片碳氮比的基本因素——总碳和总氮浓度进行深入研究, 对其组成物质的浓度差异在 2030—2220nm 区间内光谱响应的物理机制进行深入分析。在对多组典型叶片的对比分析后发现, 经连续统去除后的相对反射率光谱中可以明显观察到碳、氮浓度差异造成的影响, 而其影响与纤维素、木质素和蛋白质在此范围的吸收特征密切相关。其中, 以纤维素和木质素为代表的碳浓度的影响主要体现在 2030—2050nm 区间, 而以蛋白质为代表的氮浓度的影响则体现在 2054nm 和 2172nm 附近存在的斜率突变上。另外利用波深归一化方法再次证明了氮浓度对 2054nm 和 2172nm 处光谱特征的影响, 进一步证实蛋白质双峰特征在光谱上的响应, 并通过相关分析和回归分析验证了相对反射率光谱与碳氮比之间的定量关系。

关键词: 生化组分; 高光谱遥感; 碳氮比; 连续统去除; 波深归一化

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A

1 引 言

随着高光谱遥感技术的发展, 植被遥感的研究领域已经从对植物类型的识别与分类扩展到原子或分子水平的生化组分遥感估测上^[1,2], 其概念也扩大到生态遥感的范畴^[3]。植物的光谱特征是由植物体的各种物理结构参数及其体内各种生化组分共同决定的, 关于光谱特征与植物体各种理化参数的应用研究和模型研究也在广泛开展^[4-7]。遥感手段用于大范围生态研究可以充分利用遥感信息空间覆盖大的特点, 而高光谱遥感技术获得的从可见光到近红外上千个纳米级窄波段的反射率信息, 能更全面地反映生态系统的不同组成, 对认识生态系统及其动态变化具有重要意义^[8,9]。利用遥感进行生态测量可以突破传统生态测量费时费力、试验具有破坏性以及不适于大范围试验的局限性, 并形成遥感生态测量学这个重要的交叉分支^[10]。

碳和氮作为有机物的基本组成元素, 在生态系

统中构成庞大、复杂的碳循环和氮循环体系。植物体内部含碳物质和含氮物质的遥感定量研究是国内外植被遥感的一个重要研究方向, 许多学者利用高光谱数据在干叶、鲜叶和冠层等不同尺度对木质素、纤维素、叶绿素、蛋白质等植物生化组分进行定量研究, 但这些研究大多使用统计回归的方法, 对叶片的大量高光谱数据直接或间接进行线性回归, 获得一些入选波段和反映回归效果的确定系数 (R^2) 并对其进行评价^[11-14], 鲜有对高光谱数据与生化组分数据之间相关性的机制进行分析^[15]。实验证明, 如果用纯粹的统计方法对大量高光谱数据进行回归分析往往会得出一些不尽人意或难以解释的结果。首先是回归方程的局限性问题, Martin 等提出, 一个地区得出的氮浓度回归方程不适用于其它地区^[16]。其原因包括不精确的大气纠正、传感器的限制、背景植物和土壤背景的影响等。第二是回归方程入选波段的不稳定问题, 即用于建立回归方程所使用的样本不同, 入选波段也可能会发生变化。其原因有高光谱数据相邻波段之间的高度相关性、不同生化组

收稿日期: 2003-04-15; 修订日期: 2003-07-01

©1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40271086)和 863 项目(2003AA131170)。

作者简介: 施润和(1979—), 男, 博士研究生, 毕业于华东师范大学, 研究方向为定量遥感和地理信息系统。Email: shirunhe@hotmail.com

分由于所含元素或内部结构的相似性造成其反射光谱的相关性等。第三是回归结果与已知理论不匹配问题。此外利用高光谱数据进行生化组分的统计回归,常会因为缺少实验数据造成参与回归方程建立的波段数大于样本数,使回归具有过饱和的风险。鉴于统计方法的种种不足,研究植物生化组分遥感定量反演的物理机制是十分必要的。

碳氮比是农业、生态和全球变化领域广泛考虑的重要因子,可以体现植物的营养利用效率(NUE),是植物生命过程的重要维持和调节参数,同时也是枯枝落叶分解速率的调节因素之一,对研究植物生长在精细农业领域具有重要作用。另外碳氮比作为生态模型的重要输入参数,对于研究碳循环、氮循环和全球变化也具有重要意义。因此笔者选用一个应用广泛的生态因子作为遥感定量反演的对象,为遥感定量研究领域的拓宽作了有益的尝试。

2 原理与方法

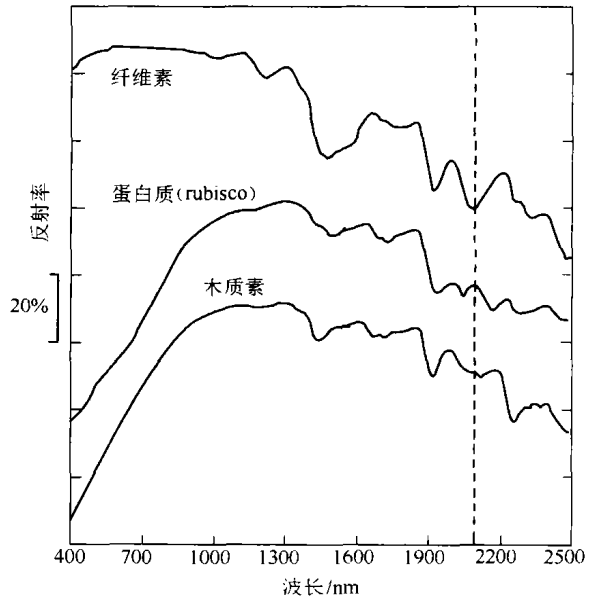
2.1 叶片及主要生化组分的反射光谱和吸收特征

高光谱地面光谱仪获得的反射光谱曲线因其波段间隔非常小(本文中为 2nm),可近似看作是一条连续变化的曲线。不同生化组分因其组成元素、内部结构等的差异而具有不同的吸收光谱、吸收特定波长的光子。图1表示了蛋白质、纤维素和木质素在 $400\text{--}2500\text{nm}$ 波长范围内的吸收特征^[17]。整个叶片的吸收特征是由其组分本身吸收光谱及其在叶片中的含量共同决定的,其形态十分复杂,这就是利用光谱数据反演生化组分含量的理论基础。

在鲜叶片中,水通常占湿重的 $40\%\text{--}80\%$,是叶片中最主要的生化组分,但由于水在 $1.4\mu\text{m}$ 和 $1.9\mu\text{m}$ 处的强吸收中心和向两侧延展的吸收翼会掩盖其它生化组分在该区域的吸收特征^[13],不利于研究叶片中碳、氮元素及其浓度对光谱曲线的影响,因此笔者采用干叶作为研究对象。

蛋白质是叶片中主要含氮物质,Elvidge^[17]对其中的右旋核酮酸1,5-二磷酸碳酸酐酶(rubisco)进行研究,并得出其光谱曲线(图1)。这种蛋白质占叶片氮含量的 $30\%\text{--}50\%$,是叶绿体中含量最多的蛋白质,它在近红外区的吸收特征分别位于 $1500, 1680, 1740, 1940, 2054, 2172, 2290$ 和 2470nm 附近。纤维素是植物细胞壁中的一种多糖,是陆地生态系统中含量最多的有机物,通常占干重的 $30\%\text{--}$

50% ,其吸收特征位于 $1220, 1480, 1930, 2100, 2280, 2340$ 和 2480nm 附近。而木质素则是另一种主要的含碳物质,通常占植物干重的 $10\%\text{--}35\%$,其吸收特征分别位于 $1450, 1680, 1930, 2050\text{--}2140, 2270, 2330, 2380$ 和 2500nm 附近。严格地说,所有有机物都含有碳,但考虑到纤维素和木质素在植物体中所占比例较大,因此本文以它们的吸收特征来代表碳元素对叶片光谱的影响。



(为避免曲线重叠,已在垂直方向上错开)

图1 蛋白质、纤维素和木质素的典型反射光谱曲线
Fig.1 Typical reflectance spectra of protein, cellulose and lignin

观察上述3种物质在 2100nm 为中心的光谱特征(图1),蛋白质在中心两侧各有一个吸收峰,分别位于 2054 和 2172nm 附近,而在 2100nm 附近则形成一个小的反射峰,形成“W”形。而纤维素则在 2100nm 处有一个明显的“V”形吸收峰,木质素也在 $2050\text{--}2140\text{nm}$ 之间有一个比较平缓的“U”形吸收特征。由于作为叶片中主要含氮物质的蛋白质和主要含碳物质的纤维素、木质素本身在这个区域存在明显差异,因此可以运用下面介绍的方法来提取叶片碳氮浓度的信息。

2.2 连续统去除法和波深归一化方法

反射光谱的吸收特征可分解成连续统(Continuum)和个别特征两部分。连续统可看作背景吸收,而其它吸收特征则叠加于其上。连续统去除法(Continuum Removal)又称为基线归一化方法(Base-

line Normalization), 是一种背景去除方法^[18-20]。首先在吸收中心两侧确定两个相对峰值点作为端点, 连接两个端点就构成一条包络在反射曲线上的直线, 称为连续统。连续统去除后的相对反射率 R' 就是用实际光谱反射率除以连续统上相应波长处的反射率。经过连续统去除后, 端点处的 R' 均为 1, 而端点之间均小于 1。从经连续统去除^[17-19]后的光谱中可以容易地得到光谱吸收特征参数, 如波深、对称度、斜率等。

波深归一化方法是在连续统去除基础上进一步处理^[13, 15]。首先用(1)式计算每个波段的波深值 D :

$$D = 1 - R' \quad (1)$$

其中 R' 是连续统去除后的相对反射率。归一化波深 D_n 如(2)式所示, 是将各波段波深除以最大波深得到的归一化比值:

$$D_n = D / D_{\max} \quad (2)$$

其中 D_{\max} 是最大波深, 即 $1 - R_{\min}$ 。文中采用 $1 - D_n$ 使归一化波深曲线的形状与连续统去除后曲线保持一致, 便于比较。

3 数据的获取和处理

文中所用的干叶片数据包括光谱数据和生化组分数据两部分, 全部来源于 NASA ACCP (Accelerated Canopy Chemistry Program)^[21]数据集。该数据集由一个跨学科的学术队伍联合采集编纂, 研究对象包括不同地区近百种植物的多种主要生化组分。干叶样品在测量光谱前都在 70℃ 环境下经过连续 48 小时的烘干处理以彻底去除水分, 并用 1mm 筛网进行均

质化处理。在 ACCP 数据集中, 光谱数据以 $\log(1/R)$ 形式表示, 波长范围从 400—2498nm, 2nm 的采样间隔和 10nm 带宽。ACCP 的生化组分数据包括叶片碳、氮占样品干重的百分比, 两者相除即可得出样品碳氮比。对于本文所用地区的叶片碳、氮含量数据都是采用 CHN 燃烧法, 通过 Perkin-Elmer CHN 元素分析仪测得。

本文选取了三个地区(表 1)的干叶样品进行比较研究, 所有原始光谱数据都转换为基于反射率的派生数据 R' 和 D_n 。在研究叶片碳、氮浓度对光谱曲线的影响中, 以 2030 和 2220nm 为两个端点, 运用连续统去除和波深归一化方法, 对具有不同碳、氮浓度的叶片光谱数据进行比较和分析。

表 1 研究地区及其样品量

Table 1 Sites studied in this paper and their sample amounts

地名(缩写)	所属州	经度/(°)W	纬度/(°)N	样品量
Harvard Forest (HF)	MA	71.7981	42.4950	187
Blackhawk Island (BHI)	WI	89.7583	43.6333	182
Howland (HOW)	ME	68.7356	45.2222	186

4 结果与分析

为研究叶片碳、氮浓度对 2030—2220nm 范围光谱曲线的影响, 笔者在表 1 所示的 3 个地区样品集中选取了 10 个有代表性的样品分成 5 个对照组进行比较(表 2), 分析碳、氮浓度的差异对相对反射率曲线以及经波深归一化曲线的影响。

表 2 研究碳、氮浓度对光谱曲线关系的 5 个对照组

Table 2 Five groups for the study of spectral changes due to different carbon or nitrogen concentrations

对照组	对象选取目的	Sample_ID	地区	植物类型	C/%*	N/%*
1	同种植物类型	92HFS10HE3	HF	东部铁杉	50.19	1.26
	不同碳浓度, 相近氮浓度	92CWS37HE5	HOW	东部铁杉	52.35	1.27
2	同种植物类型,	92BHS7RO2	BHI	红橡木	51.54	2.71
	相近碳浓度, 不同氮浓度	92HFS19RO5	HF	红橡木	51.61	1.93
3	不同植物类型,	92HFS18AB2	HF	美洲山毛榉	48.52	2.39
	不同碳浓度, 相近氮浓度	92CWS7BA2	HOW	美洲椴树	52.57	2.38
4	不同植物类型,	92BHS10BW2	BHI	美洲椴树	47.72	3.51
	相近碳浓度, 不同氮浓度	92BHS9SM5	BHI	糖槭	47.72	2.16
5	不同植物类型,	92HFS18CB1	HF	灰桦	51.59	2.98
	不同碳浓度, 不同氮浓度	92BHS3SM1	BHI	糖槭	49.13	1.93

* 占干重的百分比

4.1 碳浓度对 2100nm 吸收特征的影响

从图 1 可以看出,在 2030—2050nm 范围内,纤维素、木质素和蛋白质的光谱反射率随波长的增加都在减小,鉴于蛋白质在叶片中的含量明显少于前两者,因此可以通过该区间光谱曲线的变化趋势获取叶片碳浓度的信息。在实际操作时为了剔除背景因素的影响,采用连续统去除法对原始反射率进行处理,图 2 中的(a)–(e)分别是上述 5 个比较用例在 2030—2220nm 范围内的相对反射率曲线。

图 2(a)中所示的两种东部铁杉叶片样品的氮浓度只相差 0.01%,而碳浓度相差 2.16%,其中碳浓度较高的样品 92CWS37HE5 在图中的相对反射率曲线(实线)在 2030—2050nm 区间明显低于碳浓度较低的样品,证明因其碳浓度较高,造成该处的吸收深度更大。图 2(b)所示的两种红橡木叶片样品具有相近的碳浓度(仅相差 0.07%),虽然两者氮浓度有较大差异(相差 0.78%),但在 2030—2050nm 范围内两者的相对反射率曲线几乎重合,碳浓度略高的 92HFS19RO5(实线)稍微更低一点,这也与理论完全吻合。笔者用不同植物类型的叶片进行类似的比较,如图 2(c)–(e)所示,得出相同的结论,样品的碳浓度差异明显表现在 2030—2050nm 的相对反射率曲线的斜率上。

另外,从一般植物干叶的光谱曲线^[17]中可以看出,2100nm 吸收峰的最低处大约位于 2110—2130nm 范围内,在这个波长范围里纤维素的反射率随波长而增加,而木质素则反之。在两者共同作用下,虽然反射率在此范围内达到最小,但已无法准确反映碳浓度的信息,如图 2(e)所示。另外,由于在 2054nm 附近是蛋白质的吸收峰,虽然其在叶片中的浓度远低于纤维素和木质素,但其对整条光谱曲线的影响是很大的。

4.2 氮浓度对 2100nm 吸收特征的影响

类似地,对于氮浓度对光谱曲线的影响也可明显表现在连续统去除后的相对反射率曲线上。如图 1,蛋白质在 2054nm 和 2172nm 附近有两个明显的吸收峰,同时在 2100nm 附近形成一个反射峰。由于从 2030—2054nm 纤维素、木质素和蛋白质 3 种物质的反射率都是随着波长的增加而减小,到了 2054nm 后蛋白质的反射率达到局部最小值并开始随波长的增加而增大,正是由于这个变化使相对反射率曲线的形态也发生了相应的变化。

观察对照组 2 的两个红橡木叶片样品,它们的

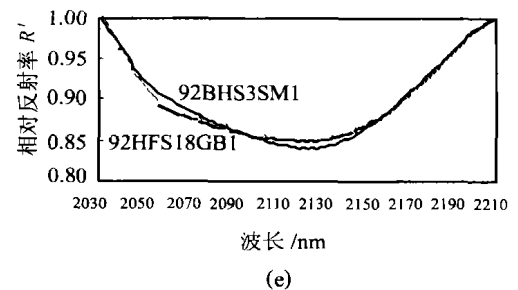
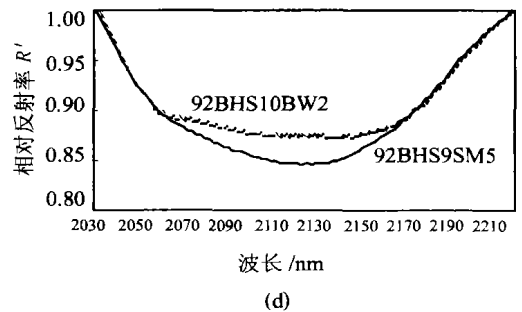
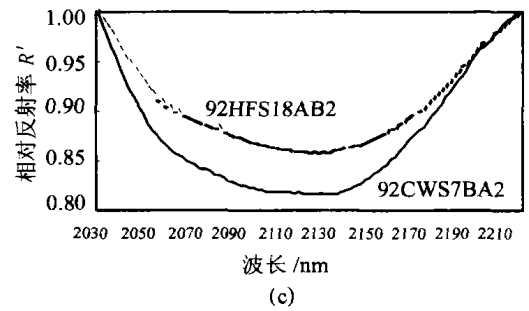
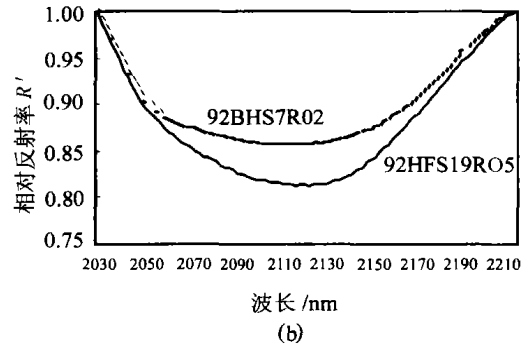
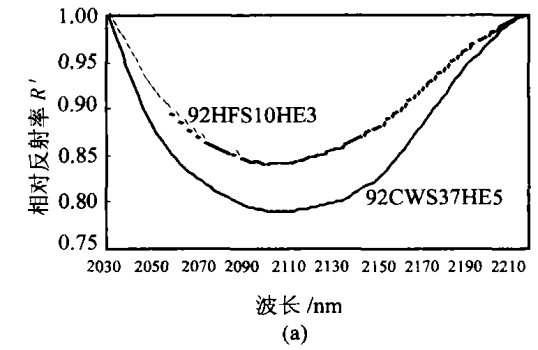


图 2 对照组 1—5 的相对反射率曲线(a)–(e)

Fig. 2 Relative reflectance spectra of Group 1–5(a)–(e)

碳浓度相近,因此图 2(b)中的两条相对反射率曲线在 2030—2050nm 范围内非常接近,但由于两者的氮浓度差异较大,使两条曲线在 2054nm 处开始明显分离。氮浓度较高的 92BHS7RO2(虚线)在该处的斜率突变比较低的 92HFS19RO5(实线)更明显,从这里我们就可以区分样品氮浓度的大小。

同样,为了不失一般性,观察对照组 4 和 5 中两个不同种类叶片样品的相对反射率曲线(图 2(d), (e))也可明显看到相同的效果。尤其对于后者中的两个样品,虽然 92HFS18GB1(虚线)的碳浓度高于 92BHS3SM1(实线),但由于前者氮浓度也相对较高,在 2054nm 附近形成一个明显的拐点,最终其相对反射率的最小值仍低于后者。由此可见,虽然叶片中的氮浓度远远小于碳浓度,但其对反射光谱的影响仍然是显著的。类似地,蛋白质在 2172nm 处的吸收峰对光谱曲线也有相似的影响。

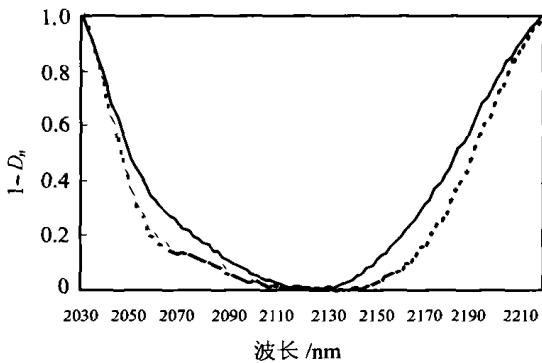


图 3 对照组 4 的 $1-D_n$ 曲线

Fig.3 Curves of $1-D_n$ of samples in Group 4

波深归一化方法使波深中心取为同一值,也可以明显反映蛋白质在中心两侧的两个吸收峰。Kokaly 曾用这个方法研究过氮浓度对光谱的影响,这里再进行一次验证^[15]。以氮浓度相差较大的对照组 4 为例,图 3 是其 $1-D_n$ 随波长的变化曲线,可以看到在 2054nm 和 2172nm 处两条曲线有较大差异,氮浓度较高者包络在较低者外侧。这两条曲线的差值曲线如图 4 所示,其在 2054nm 和 2172nm 附近的两个明显的高峰,再次验证了蛋白质在这两个波长处的特征吸收峰。

从图 3 还可以看出,经过波深均一化后的曲线,因为将其相对反射率的最低点固定为 0,引起曲线形态与相对反射率曲线相比发生了明显变化,2030—2050nm 区域受此影响无法直接体现碳素浓度造成的差异。由于 Kokaly 的研究对象是叶片氮素,并未考虑总碳的影响,与本文的研究对象碳氮比

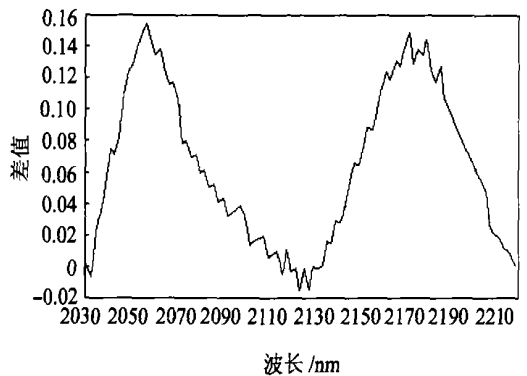


图 4 对照组 4 中两条 $1-D_n$ 曲线的差值曲线

Fig.4 Curve of minus value of $1-D_n$ in Group 4

有所区别,且其方法也与本文有所差异,因此这里只对其结果进行简单验证。

最后,笔者对全部样本和分地区样本分别进行了相关分析和回归分析,以进一步验证相对反射率光谱与碳氮比之间的关系。图 5 是所有样本的相对反射率与碳氮比的相关系数图。可以看出,在最初的 2030—2050nm 区域,相关系数大致稳定在 -0.6 左右(因为斜率为负值,所以是负相关),这与在这个波段相对反射率几乎呈一直线吻合。而从 2054nm 开始相关性进一步增大,达到 -0.8 左右。这可以认为是氮素对光谱的影响被进一步提取而使相关系数增加,这种相关关系在 0.01 水平达到显著相关。

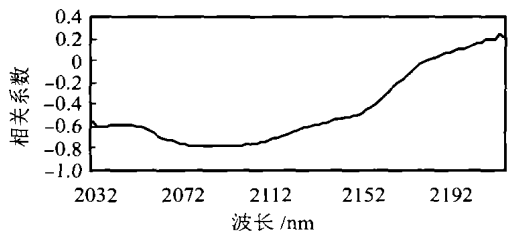


图 5 碳氮比与相对反射率的相关系数图(2030—2220nm)

Fig.5 Diagram of correlation coefficients of C:N ratio and relative reflectance from 2030nm to 2220nm

表 3 是 3 个研究地区以相对反射率作为自变量,对碳氮比进行逐步回归的结果。可以看出,在只

表 3 3 个地区碳氮比多元线性逐步回归结果

Table 3 Results of stepwise multiple linear regressions of C:N ratio in 3 sites

地区	R^2	入选波段/nm
HF	0.910	2054, 2084, 2180
BHI	0.902	2050, 2108, 2186
HOW	0.889	2058, 2086, 2210

选入 3 个波段的情况下,回归效果也很理想,而且 3 个地区的入选波段都很类似,说明这种融入了理论知识回归具有一定的稳定性。

5 讨 论

高光谱遥感获得的地物高维光谱信息,可以反映地物的内部物质组成、含量及其结构。目前高光谱遥感技术发展迅速,已经建立了地面光谱仪、机载成像光谱仪和星载高光谱成像仪的立体对地观测网络。如何从大量光谱信息中提取出所需要的信息是当前研究的一个重点和难点。通常所用的统计方法简单易行,但将其直接运用于高光谱数据尚有一定局限性,因此研究地物光谱响应的机制是必要的。本文使用的连续统去除法和波深归一化方法对于含量明显较少的蛋白质的浓度差异也能很好地表现出来。文中得出的 2030—2050nm 和 2054nm、2172nm 处的拐点两个特征经实例验证具有普遍性,也符合光谱响应的物理规律,其稳定性和区域无关性是普通统计方法无法比拟的。

关于碳氮比的反演需要补充说明以下两个问题。首先,植物体中的含碳物质远不止纤维素和木质素两种,因此只考虑这两种物质的吸收特征对光谱的影响对于精度要求高的情况是远远不够的。但是考虑到植物体中纤维素和木质素的含量远超过其它含碳物质,且从植物总碳浓度的大致分布来看,其数值还是相对稳定的,多介于占干重 45%—55%之间。另外,对碳氮比来说,总碳并不是决定因子(表 4),而且在实际应用中对其精度要求并不是很高。鉴于以上原因,用纤维素和木质素来代表总碳是可行的。

表 4 研究碳氮比和总碳、总氮的偏相关系数比较

Table 4 Comparison of partial correlation coefficients of C:N with C and N

地区	$R_{C/N,C-N}$	$R_{C/N,N-C}$
BHI	0.2137	-0.9193
HF	0.4769	-0.9552
HOW	0.5221	-0.9399

叶绿素作为植物叶片中另一种主要含氮物质,在本文也未予考虑,原因有二。首先,从化学结构上看,叶绿素与蛋白质存在很大差异,不具备组成蛋白质的基本元素——氨基酸的吸收特征,叶绿素的吸收特征集中在可见光区,在 2100nm 的近红外区域没

有吸收。其次,利用(木质素+纤维素)/蛋白质可以近似估算碳氮比,因此在精度要求不高的情况下,可以不考虑叶绿素的影响。本文只从物理机制上揭示主要含碳、氮组分的浓度对光谱曲线在 2100nm 吸收特征处的影响及其产生的原因,在实际应用中不能忽略叶绿素对总氮的贡献。

文中用多个对照用例比较了光谱曲线对不同碳氮浓度的响应及其产生的原因,并提出用连续统去除法和波深归一化方法剔除背景因素影响以揭示隐藏在背后在物理规律。虽然许多统计方法也会筛选出文中涉及的一些波段,但对物理机制的研究更有助于遥感定量反演的应用和推广。另外,植物碳氮比是遥感定量反演中一个较新的因子,这方面的研究正在不断深入地进行当中,本文提到的一些理论和方法对于植物其它生化组分的反演和高光谱数据的处理有一定的借鉴意义。

参 考 文 献 (References)

- [1] Tian Q J, Gong P, Zhao C J, et al. Research on the Feasibility of Diagnosing Water Status of Wheat by Reflectance Spectra [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2000, **45**(24): 2645—2650. [田庆久, 宫鹏, 赵春江等. 用光谱反射率诊断小麦水份状况的可行性分析 [J]. 科学通报, 2000, **45**(24): 2645—2650.]
- [2] Wu C S, Xiang Y Q, Zheng L F, et al. Estimating Chlorophyll Density of Crop Canopies by Using Hyperspectral Data [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(3): 228—232. [吴长山, 项月琴, 郑兰芬等. 利用高光谱数据对作物群体叶绿素密度估算的研究 [J]. 遥感学报, 2000, **4**(3): 228—232.]
- [3] Shen G R, Wang R C. Review of the Application of Vegetation Remote Sensing [J]. *Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.)*, 2001, **27**(6): 682—690. [申广荣, 王人潮. 植被光谱遥感数据的研究现状及其展望 [J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2001, **27**(6): 682—690.]
- [4] Chen Y S, Hu C S, Wang C, et al. Physiological Response and Spectral Characteristics of Summer Corn under Nutrient Stress Condition [J]. *Resources Science*, 2001, **26**(6): 54—58. [程一松, 胡春胜, 王成等. 养分胁迫下的夏玉米生理反应与光谱特征 [J]. 资源科学, 2001, **26**(6): 54—58.]
- [5] Wang J H, Zhao C J, Guo X W, et al. Study on the Water Status of the Wheat Leaves Diagnosed by the Spectral Reflectance [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, **34**(1): 1—4. [王纪华, 赵春江, 郭晓维等. 用光谱反射率诊断小麦叶片水分状况的研究 [J]. 中国农业科学, 2001, **34**(1): 104—107.]
- [6] Yan G J, Wu J, Wang J D, et al. Spectral Prior Knowledge and Its Use in the Remote Sensing Based Inversion of Vegetation Structure [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, **6**(1): 1—6. [阎广建, 吴均, 王锦地等. 光谱先验知识在植被结构遥感反演中的应用 [J]. 遥感学报, 2002, **6**(1): 1—6.]
- [7] Chen L F, Xu X R. The Simulation Using Monte Carlo Method in

- Vegetation Canopy Remote Sensing [J]. *Progress in Geography*, 2000, **19**(1):25-34. [陈良富,徐希孺.植被遥感的 Monte Carlo 模拟研究[J].地理科学进展,2000,**19**(1):25-34.]
- [8] Sun R, Zhu Q J. Distribution and Seasonal Change of Net Primary Productivity in China from April, 1992 to March, 1993 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000, **55**(1):36-45. [孙睿,朱启疆.中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究[J].地理学报,2000,**55**(1):36-45.]
- [9] Piao S L, Fang J Y, Guo Q H. Application of CASA Model to the Estimation of Chinese Terrestrial Net Primary Productivity [J]. *Acta Phytocologica Sinica*, 2001, **25**(5):603-608. [朴世龙,方精云,郭庆华.利用 CASA 模型估算我国植被净第一性生产力[J].植物生态学报,2001,**25**(5):603-608.]
- [10] Gong P. Progression of RS-ecometrics [J]. *Journal of Natural Resources*, 1999, **14**(4):313-317. [宫鹏.遥感生态测量学进展[J].自然资源学报,1999,**14**(4):313-317.]
- [11] Niu Z, Chen Y H, Sui H Z, et al. Mechanism Analysis of Leaf Biochemical Concentration by High Spectral Remote Sensing [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2000, **4**(1):46-50. [牛铮,陈永华,隋洪智等.叶片化学组分成像光谱遥感探测机理分析[J].遥感学报,2000,**4**(2):125-130.]
- [12] Yoder B J, Pettigrew-Crosby R E. Predicting Nitrogen and Chlorophyll Content and Concentrations from Reflectance Spectra (400-2500nm) at Leaf and Canopy Scales [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, **53**:199-211.
- [13] Kokaly R F, Clark R N. Spectroscopic Determination of Leaf Biochemistry Using Band-depth Analysis of Absorption Features and Stepwise Multiple Linear Regression [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, **67**:267-287.
- [14] Serrano L, Penuelas J, Ustin S L. Remote Sensing of Nitrogen and Lignin in Mediterranean Vegetation from AVIRIS Data: Decomposing Biochemical from Structural Signals [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, **81**:355-364.
- [15] Kokaly R F. Investigating a Physical Basis for Spectroscopic Estimates of Leaf nitrogen Concentration [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, **75**:153-161.
- [16] Martin M E, Aber J D. High Spectral Resolution Remote Sensing of Forest Canopy Lignin, Nitrogen and Ecosystem Processes [J]. *Ecological Applications*, 1997, **7**:431-443.
- [17] Elvidge C D. Visible and Near Infrared Reflectance Characteristics of Dry Plant Materials [J]. *Int. J. Remote Sensing*, 1990, **11**:1775-1795.
- [18] Ingle J D. Spectrochemical Analysis [M]. New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 1988.
- [19] Clark R N, Roush T L. Reflectance Spectroscopy: Quantitative Analysis Techniques for Remote Sensing Applications [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, **89**:6329-6340.
- [20] Clark R N. Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy [A]. *Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing* 3rd Edition [C]. New York: John Wiley and Sons, Inc., 1999.
- [21] <http://www-eosdis-ornl.gov/daacpages/accp.html>

Research on the Effects of Leaf Biochemical Concentrations on Leaf Spectra: Case Study of Inversion of C:N Ratio Based on the Absorption Features Centered at 2100nm

SHI Run-he^{1,2,3}, NIU Zheng², ZHUANG Da-fang¹

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Remote Sensing Information Science, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This paper presents an in-depth research on the effects of leaf biochemical concentrations on leaf spectra. Absorption features centered at 2100nm are focused on in this study because the spectra of predominant carbon containing and nitrogen containing components in leaf are different here apparently. Spectral changes due to different carbon or nitrogen concentrations at this waveband are examined with several samples and two rules are concluded by using continuum removed spectra. First, the spectral changes due to different carbon concentrations can be seen from 2030nm to 2050nm, where the continuum-removed spectra are nearly straight and their slopes are indicators to distinguish different carbon concentrations. Second, the spectral changes at 2054nm and 2172nm are good indicators to distinguish different nitrogen concentrations. Correlation analysis and stepwise regressions are employed to verify the relations of C:N ratio and continuum-removed spectra and the results are satisfactory.

Key words: biochemical concentration; hyperspectral remote sensing; C:N ratio; continuum removal; band-depth normalization